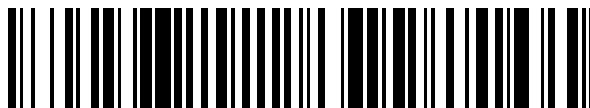


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 401 630**

21 Número de solicitud: 201200892

51 Int. Cl.:

**G01R 31/08** (2006.01)

12

SOLICITUD DE PATENTE

A1

22 Fecha de presentación:

**11.09.2012**

43 Fecha de publicación de la solicitud:

**23.04.2013**

71 Solicitantes:

**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA (100.0%)**  
**Pabellón de Gobierno, Avda de los Castros s/n**  
**39005 Santander (Cantabria) ES**

72 Inventor/es:

**BARROS GUADALUPE, Julio;**  
**DE APRÁIZ CASUSO, Matilde y**  
**DIEGO GARCÍA, Ramón Ignacio**

54 Título: **Método y sistema de detección de perturbaciones transitorias en la tensión del suministro eléctrico**

57 Resumen:

Un método de detección de una perturbación transitoria en una señal de tensión de suministro eléctrico, que comprende: a partir de una señal de tensión de suministro eléctrico  $u(t)$ , obtener una señal diferencia  $u_d(t)$ . El método comprende además: aplicar a dicha señal diferencia  $u_d(t)$  una transformada wavelet discreta para descomponer dicha señal diferencia  $u_d(t)$  en una pluralidad de bandas de frecuencia, obteniendo una pluralidad de coeficientes  $d_{ij}$ ; a partir de dicha pluralidad de coeficientes  $d_{ij}$ , calcular un vector de energías  $E_{di}$ ; a partir de dicho vector de energías  $E_{di}$ , detectar la existencia o no de una perturbación transitoria. Un sistema de detección de una perturbación transitoria en una señal de tensión de suministro eléctrico. Un programa informático que comprende medios de código de programa informático adaptados para realizar las etapas del método descrito.

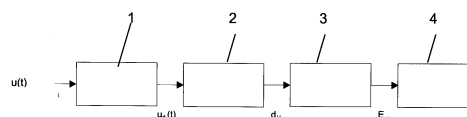


FIGURA 1

## **DESCRIPCIÓN**

# **MÉTODO Y SISTEMA DE DETECCIÓN DE PERTURBACIONES TRANSITORIAS EN LA TENSIÓN DEL SUMINISTRO ELÉCTRICO**

## **5 CAMPO DE LA INVENCION**

La presente invención pertenece al campo de la distribución de energía eléctrica y, más concretamente, al del análisis y medida de la calidad del suministro eléctrico y la protección para equipos alimentados mediante redes eléctricas.

10

## **ANTECEDENTES DE LA INVENCION**

15

Los estándares IEC 61000-4-30 (*Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4: Testing and measurement techniques. Section 30: Power quality measurement methods, Switzerland, 2008*) e IEEE Std. 1159 (*IEEE Recommended practice for monitoring electric power quality, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, USA, 2009*) definen una perturbación transitoria como un fenómeno o una magnitud que varía entre dos regímenes permanentes consecutivos durante un intervalo de tiempo corto comparado con la escala de tiempo considerada.

20

25

Las perturbaciones transitorias se producen normalmente por descargas eléctricas, por maniobras en el sistema de distribución, como la conexión o desconexión de condensadores, o por la conmutación de los equipos de los usuarios. De las distintas perturbaciones que afectan a la calidad de la energía eléctrica, las perturbaciones transitorias son de las mas perjudiciales y las más difíciles de detectar, debido a su corta duración, su carácter aleatorio y a las componentes de alta frecuencia que producen. El desarrollo de métodos y equipos de detección de estas perturbaciones es en la actualidad de gran importancia para asegurar la calidad de la energía eléctrica suministrada y evitar el efecto perjudicial que tienen sobre los equipos.

No hay un método estandarizado para la detección y el análisis de las perturbaciones transitorias como existe para otros parámetros de la calidad del suministro eléctrico, como la distorsión armónica o los huecos de tensión. En la actualidad se emplean distintos métodos sin que ninguno sea predominante sobre los otros. Además, la mayoría de los fabricantes de equipos de monitorización de la calidad del suministro eléctrico no indican el método que emplean en sus equipos, con lo que es difícil evaluar sus características de detección y análisis de los transitorios.

De acuerdo con el citado estándar IEC 61000-4-30, los métodos de detección de perturbaciones transitorias existentes son los siguientes: Método comparativo: la perturbación transitoria se detecta cuando se sobrepasa un valor umbral absoluto; Método de la envolvente: es similar al método comparativo, pero se suprime la componente fundamental antes del análisis; Método de la ventana deslizante: los valores instantáneos se comparan con los valores correspondientes del período precedente; Método  $dv/dt$ : se detecta una perturbación transitoria cuando se excede un umbral fijo absoluto de  $dv/dt$ ; Método del valor eficaz: por muestreo muy rápido el valor eficaz se calcula en intervalos muy inferiores al de un periodo de la componente fundamental y se compara con un umbral; Otros métodos: son por ejemplo las medidas de amplitud/frecuencia (transformada rápida de Fourier, wavelets, etc.). M.H.J. Bollen y I.Y-H Gu presentan, en “*Signal Processing of power quality disturbances*”, IEEE Press – Wiley Interscience, 2006, un análisis de las características de los distintos métodos.

Se han propuesto distintos instrumentos para la detección y el análisis de las perturbaciones transitorias en redes de distribución eléctrica. Por ejemplo, D. Castaldo, D. Gallo, C. Landi, y A. Testa en “*A digital instrument for nonstationary disturbance analysis in power lines*”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 53, no. 5, October 2004, pp. 1353-1361, presentan un sistema DSP en tiempo real que utiliza el método de la ventana deslizante sin eliminar el cambio en la componente fundamental en la señal de perturbación. El inicio y el final

de la perturbación se detectan cuando se superan sendos umbrales, siendo la selección de estos umbrales el punto crítico en este método.

5 M. Artioli et al (*"Low-cost DSP-based equipment for the real-time detection of transients in power systems"*, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 53, no. 4, August 2004, pp. 933-1361) y L. Peretto et al (*"Performance analysis of a robust algorithm for voltage transients detection"*, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 55, no. 6, December 2006, pp. 2244-2252) también presentan un instrumento con DSP para la detección  
10 de perturbaciones transitorias. El método propuesto se ejecuta en el dominio temporal y calcula un índice empleando la suma de las muestras de la señal de la tensión para diferentes segmentos dentro de un intervalo de observación (un ciclo o un número entero de ciclos). La perturbación se detecta si al menos un segmento en cada intervalo de observación supera un umbral especificado. De nuevo la selección  
15 del umbral es el punto crítico en este método, que no permite extraer el transitorio sin la componente fundamental como se requiere en el estándar IEEE Std 1159-2009 para su posterior análisis.

A su vez, A. Ferrero et al presentan (*"An easy VI program to detect transient disturbances in the supply voltage"*, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 54, no. 4, August 2005, pp. 1471-1474 y *"A method for testing instruments for transient detection in electric power system voltages"*, *Instrumentation and Measurement Technology Conference, IMTC 2006, Sorrento, Italy, 24-25 April 2006, pp. 1588-1591*) un método de detección empleando una  
20 ventana deslizante y un filtro de rechazo de banda para evitar el efecto de la componente fundamental en la señal transitoria. La señal transitoria filtrada se compara en el dominio del tiempo con un umbral específico para detectar la existencia de la perturbación. Las características del método dependen del tipo de filtro empleado que además, como cualquier otro filtro digital, introduce un retraso  
25 en la señal de salida filtrada, y de nuevo de la selección del umbral.  
30

Los métodos tiempo-frecuencia, tales como el análisis wavelet o una combinación de wavelets y análisis de Fourier (ver por ejemplo J. Barros, M. de Apráiz, R.I. Diego, en *"Voltage notch detection and analysis using wavelets"*, IEEE International Conference on Virtual Environments, Human-Computer Interfaces, and Measurement Systems, VECIMS 2008, Istanbul, Turkey, 14-16 July 2008, pp. 151-15522) calculan la magnitud de la señal en distintas bandas de frecuencia para la detección y el análisis de las perturbaciones transitorias.

Por ejemplo, S. Santoso et al (*"Power quality assessment via wavelet transform analysis"*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 11, no. 2, April 1996, pp. 924-930) y D.C. Robertson et al (*"Wavelets and electromagnetic power system transients"*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 11, no. 2, April 1996, pp. 1050-1058) proponen las primeras aplicaciones del análisis wavelet para el análisis de perturbaciones transitorias. En ellas se emplea la inspección visual del plano tiempo-frecuencia para la detección y el análisis de un transitorio dentro de un registro de perturbación.

En otras propuestas, como por ejemplo la de A.M. Gaouda et al, en *"Power quality detection and classification using wavelet-multiresolution signal decomposition"*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 14, no. 4, October 1999, pp. 1469-1476, se utiliza la desviación de la energía de los coeficientes de detalle de la transformada wavelet en diferentes niveles de resolución para la clasificación y cuantificación de eventos de corta duración en los sistemas de distribución eléctrica. A su vez, M. Karimi et al, en *"Wavelet based on-line disturbance detection for power quality applications"*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 15, no. 4, October 2000, pp. 1212-1220, propone generar una señal de error que contiene la perturbación superpuesta a la componente fundamental de la tensión empleando un filtro adaptativo. El filtro se utiliza para rastrear la amplitud y la fase de la componente fundamental y restársela a la señal de entrada. Esta señal de error se analiza con la transformada wavelet discreta empleando la energía en las diferentes escalas para identificar el tipo de perturbación. Esta señal de error contiene tanto los armónicos

como el ruido existente en la señal de entrada como el debido al propio transitorio de perturbación, que pueden ser muy elevados en señales altamente distorsionadas, lo que limita su capacidad de detección.

5 Otras aportaciones (por ejemplo, A.M. Gaouda et al en “*On-line disturbance classification using nearest neighbour rule*”, Electric Power Systems Research, vol. 57, no. 1, January 2001, pp. 1-8) emplean la diferencia de energía entre la señal con la perturbación y una señal sinusoidal pura en distintos niveles de la transformada wavelet para la clasificación automática de perturbaciones. Los métodos propuestos  
10 son todos de clasificación y emplean registros de perturbación previamente generados por otros equipos. La diferencia de energías entre la señal real de la perturbación y una señal sinusoidal ideal con el valor de la tensión nominal, contiene parte de la componente fundamental de la señal (ya que la tensión real no tiene por qué ser idéntica a la tensión nominal), el cambio en la componente fundamental  
15 debido a la propia perturbación y las componentes armónicas y el ruido existentes en la señal real, lo que hace que el método propuesto sea limitado, ya que la presencia de todas estas componentes puede enmascarar la señal transitoria e introducir errores significativos en su detección. Otro problema asociado con este método es la necesidad de sincronizar perfectamente la señal transitoria y la señal de referencia  
20 para comparar la energía de las señales correspondiente a intervalos iguales.

C-C Liao y H-T Yang en “*Recognizing noise-influenced power quality events with integrated feature extraction and neuro-fuzzy network*”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 24, no. 4, October 2009, pp. 2132-2141, también utilizan la diferencia  
25 de energías en distintos niveles de la transformada wavelet, pero en este caso empleando la señal del transitorio previamente filtrada como señal de referencia para evitar el efecto del ruido en las capacidades de clasificación del método. En este caso el método propuesto no opera en tiempo real ya que utiliza registros de perturbación previamente obtenidos.

30 Por último, T. Tarasiuk y M. Szweda presentan en “*DSP instrument for transient*

*monitoring*”, Computer Standards & Interfaces, vol. 33, 2011, pp. 182-190, un instrumento para la detección de perturbaciones transitorias y el “notching” de tensión empleando wavelets. El sistema propuesto detecta las perturbaciones empleando ventanas de 10 ciclos de la señal fundamental, cuando los valores de las muestras reconstruidas en la banda de frecuencia seleccionada superan un determinado umbral. El sistema no es de tiempo real y no tiene en cuenta el efecto del ruido en las distintas bandas de frecuencia.

Como se ha explicado anteriormente, los métodos de detección de perturbaciones transitorias emplean la forma de onda de la tensión del suministro o la forma de onda del transitorio previamente extraído de esa tensión. De los métodos que emplean la forma de onda de la tensión de suministro, el método comparativo es el más importante. En este caso la perturbación se detecta cuando se supera un umbral absoluto. El método es sencillo de implementar pero no tiene ninguna discriminación y necesita un procesado adicional para caracterizar el transitorio.

Los métodos que emplean la señal extraída del transitorio, realizan la detección cuando ésta supera un umbral específico. La diferencia de estos métodos está en la forma de extraer el transitorio. Se puede extraer empleando un filtro de paso alto que elimine la componente fundamental. Si el filtro se realiza en hardware el método no necesita ningún procesado adicional, pero si se hace en software existe el retraso asociado a los filtros digitales. El mayor inconveniente de este método es que valores altos de los armónicos o del ruido pueden producir detecciones falsas. También se puede emplear un filtro notch en lugar de un filtro de paso alto para en este caso eliminar la componente fundamental y los armónicos. Las características del filtro empleado y el retraso que introduce son las limitaciones de este método.

En el método de la ventana deslizante se necesita un procesado adicional para extraer la señal del transitorio y emplear un buffer cíclico para mantener almacenadas las muestras del ciclo precedente. El inconveniente de este método es que grandes variaciones de frecuencia producidas por el transitorio pueden dar origen a

detecciones falsas.

Los métodos en el dominio tiempo-frecuencia emplean fundamentalmente la transformada wavelet que permite un análisis de la señal empleando distintas resoluciones en el tiempo y en la frecuencia. Cuando el transitorio es muy rápido, son las bandas de alta frecuencia las que mejor permiten su detección con una alta resolución en el tiempo. Cuando el transitorio es de mayor duración, las bandas de frecuencia intermedias son las que presentan mejores resultados en la detección. Empleando el análisis wavelet se puede escoger la banda de frecuencia más adecuada para dar la mejor solución en cada caso concreto. Sin embargo, la mayoría de los métodos que se han propuesto hasta ahora empleando wavelets son métodos de clasificación de perturbaciones que utilizan registros previamente almacenados por equipos de monitorización de la calidad de la energía eléctrica y por tanto no permiten la detección on-line y en tiempo real de las perturbaciones transitorias. Otro problema práctico relacionado con el uso de wavelets para la detección de transitorios es el efecto del ruido en los coeficientes de la transformada wavelet, sobre todo para el caso de transitorios lentos o de pequeña magnitud, así como en el caso de detección en señales altamente distorsionadas. En estos casos el ruido puede enmascarar la perturbación transitoria haciendo muy difícil o imposible su detección. Se han propuesto distintas técnicas para la eliminación del ruido como paso previo al análisis del transitorio, pero estas operan de nuevo sobre registros de perturbación y no permiten la detección en tiempo real.

## **RESUMEN DE LA INVENCION**

La presente invención trata de resolver los inconvenientes mencionados anteriormente mediante un método de detección de una perturbación transitoria en una señal de tensión de suministro eléctrico.

Concretamente, en un primer aspecto de la presente invención, se proporciona un



método de detección de una perturbación transitoria en una señal de tensión de suministro eléctrico, que comprende: a partir de una señal de tensión de suministro eléctrico  $u(t)$ , obtener una señal diferencia  $u_d(t)$ ; aplicar a dicha señal diferencia  $u_d(t)$  una transformada wavelet discreta para descomponer dicha señal diferencia  $u_d(t)$  en una pluralidad de bandas de frecuencia, obteniendo una pluralidad de coeficientes  $d_{ij}$ ; a partir de dicha pluralidad de coeficientes  $d_{ij}$ , calcular un vector de energías  $E_{di}$ ; a partir de dicho vector de energías  $E_{di}$ , detectar la existencia o no de una perturbación transitoria.

En una posible realización, la obtención de una señal diferencia  $u_d(t)$  comprende: muestrear dicha señal de entrada  $u(t)$ ; aplicar una ventana deslizante para calcular de forma continua para cada ciclo de la tensión, de duración temporal  $T$ , dicha señal diferencia  $u_d(t)$ . La señal diferencia  $u_d(t)$  se obtiene preferentemente restando cada muestra de un ciclo con la muestra correspondiente a un ciclo anterior previamente almacenada en memoria como señal de referencia.

En una posible realización, la aplicación de una transformada wavelet discreta sobre la señal diferencia  $u_d(t)$  comprende calcular una pluralidad de coeficientes de detalle y de aproximación.

En una posible realización, el cálculo de un vector de energías comprende calcular los valores de las energías correspondientes a cada una de las bandas de frecuencia de

la siguiente forma:  $E_{di} = \sum_{j=1}^N |d_{ij}|^2$

donde  $d_{ij}$  son los coeficientes wavelet de la señal diferencia  $u_d(t)$ ,  $i = 1..L$  es el número de niveles de descomposición,  $j = 1..N$  es el número de coeficientes wavelet en cada nivel de descomposición correspondientes a un periodo de la componente fundamental de la señal y  $f_s$  es la frecuencia de muestreo.

En una posible realización, la detección de la perturbación transitoria se realiza comparando el vector de energías  $E_{di}$  con unos umbrales previamente obtenidos para

cada banda de frecuencia. En esta realización, en caso de no existencia de perturbación, el ciclo actual se almacena como ciclo de referencia y se repite el proceso con las muestras del ciclo siguiente. En caso de detección de perturbación en el ciclo actual, se almacena el ciclo de referencia previo a la perturbación y se comparan los ciclos subsiguientes con ese ciclo de referencia mientras se mantenga la perturbación.

En una posible realización, el método comprende almacenar los ciclos de perturbación, generando un registro de la perturbación.

En una posible realización, la perturbación transitoria se clasifica de acuerdo con su magnitud y banda de frecuencia.

En otro aspecto de la presente invención, se proporciona un sistema de detección de una perturbación transitoria en una señal de tensión de suministro eléctrico, que comprende: medios para, a partir de una señal de tensión de suministro eléctrico  $u(t)$ , obtener una señal diferencia  $u_d(t)$ ; medios para aplicar a dicha señal diferencia  $u_d(t)$  una transformada wavelet discreta para descomponer dicha señal diferencia  $u_d(t)$  en una pluralidad de bandas de frecuencia, obteniendo una pluralidad de coeficientes  $d_{ij}$ ; medios para, a partir de dicha pluralidad de coeficientes  $d_{ij}$ , calcular un vector de energías  $E_{di}$ ; medios para, a partir de dicho vector de energías  $E_{di}$ , detectar la existencia o no de una perturbación transitoria.

Finalmente, se proporciona un programa informático que comprende medios de código de programa informático adaptados para realizar las etapas del método descrito anteriormente, cuando dicho programa se ejecuta en un ordenador, un procesador de señal digital, una disposición de puertas de campo programable, un circuito integrado de aplicación específica, un microprocesador, un microcontrolador, y cualquier otra forma de hardware programable.

Las ventajas de la invención se harán evidentes en la descripción siguiente.

## BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

Con objeto de ayudar a una mejor comprensión de las características de la invención,  
de acuerdo con un ejemplo preferente de realización práctica del mismo, y para  
complementar esta descripción, se acompaña como parte integrante de la misma, un  
juego de dibujos, cuyo carácter es ilustrativo y no limitativo. En estos dibujos:

La figura 1 muestra un diagrama de bloques del método según una posible  
realización de la invención.

La figura 2 ilustra una posible realización de la etapa 2 del método de la invención.

La figura 3 ilustra una posible realización de la etapa 3 del método de la invención.

La figura 4 ilustra una posible realización de la etapa 4 del método de la invención.

La figura 5 muestra la señal de entrada con un transitorio oscilatorio de 5 kHz (fig.  
5a) y la señal transitoria (fig. 5b) de acuerdo con un ejemplo de aplicación del  
método de la invención.

La figura 6 muestra la evolución temporal del vector característico de la señal  
diferencia del ejemplo de la figura 5.

La figura 7 muestra la reconstrucción de la señal transitoria sin la componente  
fundamental, del ejemplo de la figura 5.

La figura 8 muestra la señal total con una perturbación transitoria de doble frecuencia  
de dos ciclos (fig. 8a), la señal de perturbación transitoria (fig. 8b) y la variación  
aleatoria añadida a la señal de test fundamental, de acuerdo con otro ejemplo de  
aplicación del método de la invención.

La figura 9 muestra la evolución temporal del vector característico de la señal diferencia (fig. 9a) y la reconstrucción de la señal transitoria sin la componente fundamental usando la IDWT, del ejemplo de la figura 8.

5 La figura 10 muestra un registro de 10 ciclos con una perturbación transitoria medida en la tensión de distribución de baja tensión (fig. 10a), un zoom del registro (fig. 10b) y la señal de perturbación transitoria (fig. 10c).

10 La figura 11 muestra la variación temporal del vector de energías de la señal transitoria (fig. 11a) y la reconstrucción de la señal transitorio sin la componente fundamental usando la DWT (fig. 11b).

## 15 DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA INVENCION

En este texto, el término “comprende” y sus variantes no deben entenderse en un sentido excluyente, es decir, estos términos no pretenden excluir otras características técnicas, aditivos, componentes o pasos.

20 Además, los términos “aproximadamente”, “sustancialmente”, etc. deben entenderse como indicando valores próximos a los que dichos términos acompañen, ya que por errores de cálculo o de medida, resulte imposible conseguir esos valores con total exactitud.

25 Las siguientes realizaciones preferidas se proporcionan a modo de ilustración, y no se pretende que sean limitativos de la presente invención. Además, la presente invención cubre todas las posibles combinaciones de realizaciones particulares y preferidas aquí indicadas. Para los expertos en la materia, otros objetos, ventajas y características de la  
30 invención se desprenderán en parte de la descripción y en parte de la práctica de la invención.

Se presenta un nuevo método y sistema en el dominio tiempo-frecuencia para la

detección, almacenamiento y clasificación en tiempo real de perturbaciones transitorias en la tensión del suministro eléctrico, que utiliza las ventajas de los métodos en ambos dominios para mejorar las características de los métodos existentes. El método propuesto es implementable en software, concretamente en cualquier lenguaje de programación convención, tales como LabVIEW, Matlab, C, o cualquier otro. La perturbación se detecta al final del ciclo siguiente al ciclo en que tiene lugar, es decir, el retraso es de 1 ciclo (prácticamente en tiempo real).

Como se detalla más adelante, la señal de la perturbación se extrae en el dominio del tiempo empleando el método de la ventana deslizante, lo que permite eliminar la componente fundamental y los armónicos y atenuar de forma considerable el ruido en la señal. El transitorio se detecta, se clasifica y se analiza en el dominio de la frecuencia empleando la variación de las energías de los coeficientes wavelet de la señal del transitorio previamente extraída.

Las perturbaciones transitorias que se pueden detectar, tanto de alta como de baja frecuencia, son las siguientes: sobretensiones transitorias (oscilatorias e impulsivas), variaciones de corta duración del valor cuadrático medio (huecos de tensión, sobretensiones e interrupciones del suministro), armónicos variables en el tiempo y el notching en la tensión del suministro, así como otras perturbaciones transitorias que provoquen una disimilitud entre un ciclo de señal y el anterior.

La figura 1 muestra un esquema del método de la invención. En concreto, se ilustran las etapas del mismo: Una primera etapa 1 de extracción de la perturbación, aplicada a una señal de entrada (tensión de suministro)  $u(t)$ , que da como resultado una señal diferencia  $u_d(t)$ ; una segunda etapa 2 de análisis wavelet aplicada a dicha señal diferencia  $u_d(t)$ , que da como resultado unos coeficientes wavelet  $d_{ij}$ ; una tercera etapa 3 de extracción de un vector de energías a partir de dichos coeficientes wavelet  $d_{ij}$ , que da como resultado un vector de energías  $E_{di}$ ; y una cuarta etapa 4 de detección y procesado del transitorio.

Etapas 1 - Extracción de la perturbación

La extracción de la perturbación se realiza en el dominio del tiempo. A partir del muestreo continuo de una señal eléctrica  $u(t)$ , tal como la tensión de suministro de la red eléctrica, se aplica una ventana deslizante para calcular para cada ciclo de la tensión, de duración temporal  $T$ , una señal diferencia,  $u_d(t)$ , obtenida restando cada muestra del ciclo actual con la muestra correspondiente al último ciclo sin perturbación, previamente almacenada en memoria como señal de referencia. Nótese que el último ciclo sin perturbación puede ser el ciclo inmediatamente anterior o cualquier otro. La siguiente ecuación refleja el caso particular de una señal diferencia considerando que el último ciclo sin perturbación es el ciclo inmediatamente anterior (periodo  $T$ ):

$$u_d(t) = u(t) - u(t - T)$$

En un caso general en el que el último ciclo sin perturbación ha ocurrido hace  $p$  ciclos, la ecuación de la señal diferencia es:

$$u_d(t) = u(t) - u(t - pT)$$

Este proceso elimina las componentes armónicas estacionarias y la componente fundamental de la tensión del suministro eléctrico y atenúa el ruido existente en la señal de forma considerable. De esta forma, si en un ciclo no hay perturbación transitoria, la señal diferencia es aproximada o sustancialmente cero. Si sí hay perturbación transitoria, la señal diferencia comprende prácticamente esa perturbación transitoria, en la misma posición en el tiempo, más algo de ruido (el ruido se ve atenuado considerablemente).

A modo de ejemplo, la extracción de la perturbación puede realizarse mediante un medidor de calidad del suministro eléctrico adecuado para realizar tal medida, o mediante transformadores de efecto Hall convencionales junto con una tarjeta de adquisición de datos a la frecuencia de trabajo.

Etapla 2 - Análisis wavelet

Sobre la señal diferencia obtenida,  $u_d(t)$ , y siempre que se supere un umbral de variación previamente definido (para evitar la ejecución del método en caso de fluctuaciones irrelevantes), se aplica la transformada wavelet discreta (DWT) para descomponer la señal en distintas bandas de frecuencia, calculando los coeficientes wavelet, es decir, los coeficientes de detalle  $d$  y de aproximación  $a$  que cubren todo el espectro de la señal, tal y como se esquematiza en la figura 2. En una realización particular, la función wavelet que se emplea es la Daubechies con cuatro coeficientes (db4). Alternativamente, pueden usarse otras funciones wavelet convencionales o hechas a medida. Nótese que para perturbaciones en la tensión del suministro eléctrico, se suelen usar funciones wavelet de pocos coeficientes para reducir tiempo de cómputo, sin disminuir sustancialmente el rendimiento.

La figura 2 muestra la realización de la transformada discreta wavelet de la señal diferencia  $u_d(t)$  mediante la función Daubechies con cuatro coeficientes (db4) empleando el método propuesto por S.G. Mallat en "*A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation*", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 11, no. 7, pp. 674-693, July 1989. Para ello se utiliza un banco de filtros como se indica en la figura 2a), donde se emplea la función wavelet como el filtro de paso bajo (LP) y su dual como el filtro de paso alto (HP). La salida del filtro de paso alto da las componentes de alta frecuencia de la señal (los coeficientes de detalle) y la salida del filtro de paso bajo da las componentes de baja frecuencia (los coeficientes de aproximación). Decimando por dos la salida del filtro de paso bajo ( $\downarrow 2$ ) escala los coeficientes wavelet por dos para la etapa siguiente. La salida del filtro de paso bajo se descompone de nuevo para obtener más detalles de la señal y así sucesivamente. En cada nivel del banco de filtros las componentes de frecuencia de la señal se dividen en dos partes, realizando la descomposición logarítmica de la figura 2b), donde  $f_s$  es la frecuencia de muestreo.

En una realización alternativa, en vez de la transformada wavelet discreta se usa una

transformada *wavelet packet*, que comprende un árbol a partir de los coeficientes de detalle (obtenidos de los filtros HP).

### Etapa 3 - Extracción del vector de energías

5

Con los coeficientes del análisis wavelet se calculan los valores de las energías correspondientes a cada una de las bandas de frecuencia  $E_{di}$ .

$$E_{di} = \sum_{j=1}^N |d_{ij}|^2$$

10

donde  $d_{ij}$  son los coeficientes wavelet de la señal diferencia  $u_d(t)$ ,  $i = 1..L$  el número de niveles de descomposición,  $j = 1..N$  el número de coeficientes wavelet en cada nivel de descomposición correspondientes a un periodo de la componente fundamental de la señal y  $f_s$  la frecuencia de muestreo. Nótese que la expresión  $d_{ij}$  comprende tanto los coeficientes de detalle como los coeficientes de aproximación. La figura 3 ilustra la extracción del vector de energías, coeficientes empleados en cada nivel y bandas de frecuencia que caracterizan.

15

Estas energías son muy pequeñas -idealmente nulas- en el caso de no existencia de una perturbación transitoria, mientras que presentan grandes variaciones en las distintas bandas de frecuencia en el caso de una perturbación transitoria, dependiendo del tipo de perturbación transitoria, su frecuencia y su magnitud.

20

### Etapa 4 - Detección y procesado del transitorio

La detección de una perturbación transitoria se realiza en el dominio de la frecuencia en la última fase del método. Para ello se compara el vector de energías  $E_{di}$  con unos umbrales específicos previamente obtenidos para cada banda de frecuencia para la red de distribución específica que se esté monitorizando. Así se determina, por ejemplo, qué perturbaciones son realmente significativas.

25



En caso de no existencia de perturbación el ciclo actual se almacena como ciclo de referencia y se repite el proceso con las muestras del ciclo siguiente. En caso de detección de perturbación en el ciclo actual, el ciclo de referencia previo a la perturbación se congela en memoria y se comparan los ciclos subsiguientes con ese ciclo de referencia mientras se mantenga la perturbación. Todos los ciclos de perturbación se almacenan en memoria generando un registro completo de la perturbación.

Los umbrales de perturbación se calculan por medio de un análisis estadístico de los valores de las energías de la señal diferencia en las distintas bandas de frecuencia en ausencia de perturbación en la tensión del suministro eléctrico y de la magnitud mínima de las energías asociadas a las perturbaciones que se quieren detectar.

El método y sistema desarrollado también permiten almacenar en memoria, para el posterior análisis y clasificación de la perturbación transitoria, las muestras de la tensión de suministro, los valores de las muestras de la señal diferencia y la señal transitoria sin la componente fundamental obtenida aplicando la transformada wavelet inversa a las bandas de frecuencia adecuadas, previamente obtenidas aplicando la transformada wavelet discreta, para la reconstrucción de la señal en el dominio del tiempo con la frecuencia de muestreo original. La figura 4 ilustra la reconstrucción de la señal del transitorio en el dominio del tiempo con la frecuencia de muestreo original y sin la componente fundamental.

La clasificación de la perturbación dentro de los distintos tipos que permite detectar el método propuesto se lleva a cabo analizando qué bandas de energía de la señal diferencia superan los umbrales específicos, ya que cada tipo de perturbación tiene un patrón de energías diferente.

A continuación se describen varios ejemplos experimentales de detección de perturbaciones de acuerdo con el método de la invención. En concreto, se analizan varios casos usando diferentes señales de test con diferentes niveles de ruido, para

demostrar el rendimiento del método desarrollado para la detección de perturbaciones transitorias. La frecuencia de muestreo usada en los casos de estudio fue de 12,8 kHz. Para la descomposición de la señal de perturbación en las siete bandas de frecuencia de salida mostradas en la tabla I se ha usado un árbol de descomposición de seis niveles, siendo la función wavelet madre una db4.

TABLA I: COEFICIENTES DE SALIDA Y BANDAS DE FRECUENCIA DE UNA DWT DE SEIS NIVELES CUANDO SE USA UNA SEÑAL DE MUESTREO DE 12,8 kHz

Nivel DWT	Bandas de frecuencia
1 – d <sub>1</sub>	3.2 kHz – 6.4 kHz
2 – d <sub>2</sub>	1.6 kHz – 3.2 kHz
3 – d <sub>3</sub>	800 Hz – 1.6 kHz
4 – d <sub>4</sub>	400 Hz – 800 Hz
5 – d <sub>5</sub>	200 Hz – 400 Hz
6 – d <sub>6</sub>	100 Hz – 200 Hz
6 – a <sub>6</sub>	0 Hz – 100 Hz

#### CASO A – Transitorio oscilatorio de 5kHz

El primer caso de estudio considera un transitorio oscilatorio. De acuerdo con el estándar IEEE 1159, un transitorio oscilatorio de baja frecuencia es un transitorio con una frecuencia inferior a 5 kHz y una duración entre 0,3 milisegundos y 50 milisegundos. Estos transitorios se producen básicamente por la conexión de bancos de condensadores y pueden tener una magnitud hasta 2 pu pero su rango típico está entre 1,3 y 1,5 pu. Un transitorio oscilatorio se puede modelar por medio de la siguiente relación:

$$A \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \cos(2\pi f_t t)$$

donde A es la magnitud, f<sub>t</sub> es la frecuencia de oscilación y τ es la constante de tiempo.

La figura 5a) muestra diez ciclos de una componente fundamental de 230 voltios y 50 Hz con el transitorio oscilatorio de la figura 5b) superpuesto. La figura 5b) muestra la señal transitoria, con  $A = 100$  V, frecuencia de oscilación  $f_t = 5$  kHz y  $\tau = 800$   $\mu$ s.

5 La figura 6 muestra el vector de energías de la señal de perturbación (la señal diferencia) correspondiente a las siete bandas frecuenciales de la tabla I. Como puede verse, el vector energía en la banda frecuencial de 3200 – 6400 Hz detecta claramente el transitorio oscilatorio de 5 kHz en el cuarto periodo de la señal. Los otros componentes del vector energía permanecen prácticamente sin variaciones. La figura 7  
10 muestra la reconstrucción de la señal de perturbación filtrada (sin la componente fundamental) en el dominio temporal usando los coeficientes  $d_1$  a  $d_6$  respectivamente de DWT.

#### CASO B – Transitorio de doble frecuencia con variación lenta en la fundamental

15 Este caso de estudio considera la señal transitoria de doble frecuencia superpuesta en una señal de voltaje con distorsión fundamental y armónico de baja frecuencia, propuesta por M.H.J. Bollen y I.Y-H Gu, en “*Signal Processing of power quality disturbances*”, IEEE Press – Wiley Interscience, 2006, para testear el rendimiento del  
20 método propuesto.

La figura 8a) muestra diez ciclos de la señal de entrada con una componente fundamental de 230 voltios y una magnitud del 2,5; 3 y 1,5% para los armónicos 3, 5, y 7, respectivamente, con una señal transitoria de dos ciclos de duración, consistente en  
25 componentes de 370 y 410 Hz con magnitudes de 23 y 12 voltios respectivamente, superpuestas. La figura 8b) muestra la forma de onda de la señal transitoria. Se incluye una variación aleatoria de la señal, usando el método propuesto por M.H.J. Bollen y I.Y-H Gu, obteniéndose cualquier voltaje de muestra a partir de la muestra anterior, añadiendo un número aleatorio, lo que resulta en una variación lenta de la componente  
30 fundamental. La figura 8c) muestra la variación aleatoria añadida a la señal de test.

La figura 9 muestra los resultados obtenidos usando el método de detección y extracción propuesto. La figura 9a) muestra el vector de energías de la señal de perturbación (la señal diferencia) correspondiente a las siete bandas frecuenciales de la tabla I para los diez ciclos de la señal cuando se usa muestreo a 12,8 kHz. Como puede verse, los vectores energía en las bandas frecuenciales de 200 – 400 Hz y 400 – 800 Hz respectivamente ( $E_{d5}$  y  $E_{d4}$ ) detectan claramente la perturbación transitoria durante los periodos cuatro y cinco de la señal diferencia. El resto de componentes del vector energía permanecen sin variaciones. Finalmente, la figura 9b) muestra la reconstrucción de la señal transitoria filtrada (sin la componente fundamental) en el dominio temporal usando los coeficientes  $d_1$  a  $d_6$  respectivamente de DWT.

#### CASO C – Transitorio medido en la red de distribución de baja tensión

En este caso de estudio se presenta un transitorio medido en la red de distribución de baja tensión de un edificio en el campus de la Universidad de Cantabria. El edificio está alimentado por un transformador de distribución trifásico de 12 kV/380 V. Un alto porcentaje de la carga del edificio la forman sistemas de iluminación y computadores y otros equipos de tecnologías de la información. El edificio tiene también varios laboratorios con máquinas eléctricas, dispositivos electromecánicos y una instalación de soldadura de arco. La figura 10a) muestra 10 ciclos de la tensión de alimentación con el transitorio detectado, la figura 10b) un zoom de la parte central del registro y la figura 10c) la señal transitoria.

La figura 11 muestra los resultados obtenidos usando el método propuesto. La figura 11a) muestra el vector de energías de la señal de perturbación correspondiente a las siete bandas frecuenciales de la tabla I para los diez ciclos de la señal cuando se usa muestreo a 12,8 kHz. Como puede verse, los vectores de energía en las bandas frecuenciales de 400 – 800 Hz, 800 – 1600 Hz y 1600 – 3200 Hz respectivamente, detectan claramente la perturbación transitoria en el cuarto ciclo de la señal diferencia. La figura 11b) muestra la reconstrucción de la señal transitoria filtrada (sin la

componente fundamental) en el dominio temporal usando los coeficientes  $d_1$  a  $d_6$  respectivamente de DWT.

En conclusión, se propone un nuevo algoritmo de detección y extracción de perturbaciones transitorias en sistemas de potencia usando una transformada wavelet discreta (DWT). El algoritmo opera on-line y en tiempo real y aplica la DWT a cada ciclo de una señal diferencia obtenida comparando cada muestra de voltaje con la muestra correspondiente del periodo previo. El algoritmo opera en tiempo real porque la perturbación se detecta al final del ciclo siguiente al ciclo en que tiene lugar, es decir, el retraso es de 1 ciclo (20 milisegundos en sistemas de distribución de 50 Hz), lo que permite considerar el método como de tiempo real. Las energías de los coeficientes wavelet se usan como vector característico para detectar una perturbación transitoria en la señal de entrada. Se usan diferentes señales de test para demostrar el buen rendimiento del método desarrollado.

## REIVINDICACIONES

1. Un método de detección de una perturbación transitoria en una señal de tensión de suministro eléctrico, que comprende:

a partir de una señal de tensión de suministro eléctrico  $u(t)$ , obtener una señal diferencia  $u_d(t)$ ;

estando el método caracterizado por:

aplicar a dicha señal diferencia  $u_d(t)$  una transformada wavelet discreta para descomponer dicha señal diferencia  $u_d(t)$  en una pluralidad de bandas de frecuencia, obteniendo una pluralidad de coeficientes  $d_{ij}$ ;

a partir de dicha pluralidad de coeficientes  $d_{ij}$ , calcular un vector de energías  $E_{di}$ ;

a partir de dicho vector de energías  $E_{di}$ , detectar la existencia o no de una perturbación transitoria.

2. El método de la reivindicación 1, donde dicha obtención de una señal diferencia  $u_d(t)$  comprende:

muestrear dicha señal de entrada  $u(t)$ ;

aplicar una ventana deslizante para calcular de forma continua para cada ciclo de la tensión, de duración temporal  $T$ , dicha señal diferencia  $u_d(t)$ .

3. El método de la reivindicación 2, donde dicha señal diferencia  $u_d(t)$  se obtiene restando cada muestra de un ciclo con la muestra correspondiente a un ciclo anterior previamente almacenada en memoria como señal de referencia.

4. El método de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde dicha aplicación de una transformada wavelet discreta sobre dicha señal diferencia  $u_d(t)$  comprende calcular una pluralidad de coeficientes de detalle y de aproximación.

5. El método de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde dicho cálculo de un vector de energías comprende calcular los valores de las energías correspondientes

a cada una de las bandas de frecuencia de la siguiente forma:

$$E_{di} = \sum_{j=1}^N |d_{ij}|^2$$

donde  $d_{ij}$  son los coeficientes wavelet de la señal diferencia  $u_d(t)$ ,  $i = 1..L$  es el número de niveles de descomposición,  $j = 1..N$  es el número de coeficientes wavelet en cada nivel de descomposición correspondientes a un periodo de la componente fundamental de la señal y  $f_s$  es la frecuencia de muestreo.

6. El método de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde dicha detección de la perturbación transitoria se realiza comparando dicho vector de energías  $E_{di}$  con unos umbrales previamente obtenidos para cada banda de frecuencia.

7. El método de la reivindicación 6, donde en caso de no existencia de perturbación, el ciclo actual se almacena como ciclo de referencia y se repite el proceso con las muestras del ciclo siguiente.

8. El método de cualquiera de las reivindicaciones 6 ó 7, donde en caso de detección de perturbación en el ciclo actual, se almacena el ciclo de referencia previo a la perturbación y se comparan los ciclos subsiguientes con ese ciclo de referencia mientras se mantenga la perturbación.

9. El método de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende almacenar los ciclos de perturbación, generando un registro de la perturbación.

10. El método de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde dicha perturbación transitoria se clasifica de acuerdo con su magnitud y banda de frecuencia.

11. Un sistema de detección de una perturbación transitoria en una señal de tensión de suministro eléctrico, que comprende:

medios para, a partir de una señal de tensión de suministro eléctrico  $u(t)$ , obtener una señal diferencia  $u_d(t)$ ;

estando el sistema caracterizado por:

5        medios para aplicar a dicha señal diferencia  $u_d(t)$  una transformada wavelet discreta para descomponer dicha señal diferencia  $u_d(t)$  en una pluralidad de bandas de frecuencia, obteniendo una pluralidad de coeficientes  $d_{ij}$ ;

medios para, a partir de dicha pluralidad de coeficientes  $d_{ij}$ , calcular un vector de energías  $E_{di}$ ;

10       medios para, a partir de dicho vector de energías  $E_{di}$ , detectar la existencia o no de una perturbación transitoria.

12. Un programa informático que comprende medios de código de programa informático adaptados para realizar las etapas del método según cualquiera de las reivindicaciones de la 1 a la 10, cuando dicho programa se ejecuta en un ordenador, un procesador de señal digital, una disposición de puertas de campo programable, un  
15        circuito integrado de aplicación específica, un microprocesador, un microcontrolador, y cualquier otra forma de hardware programable.



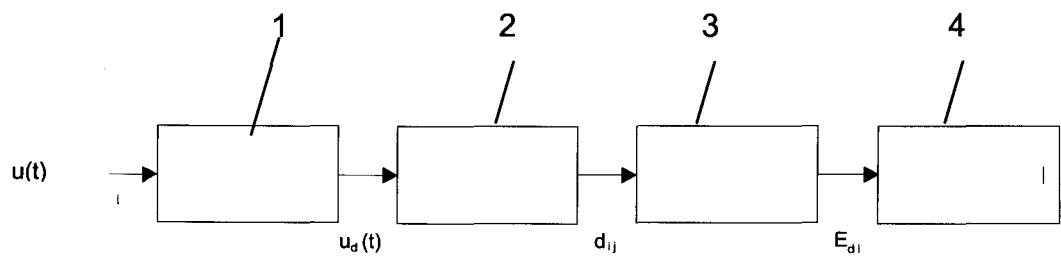
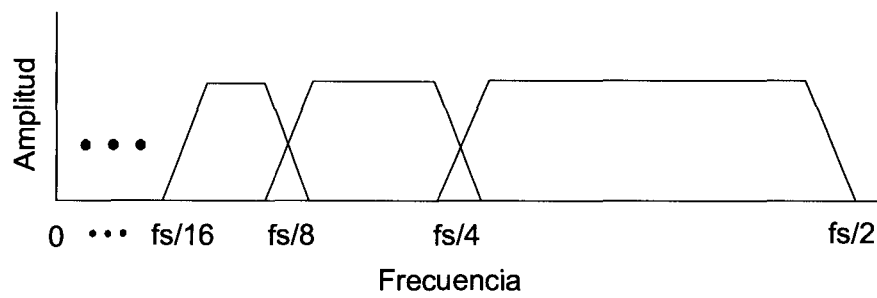
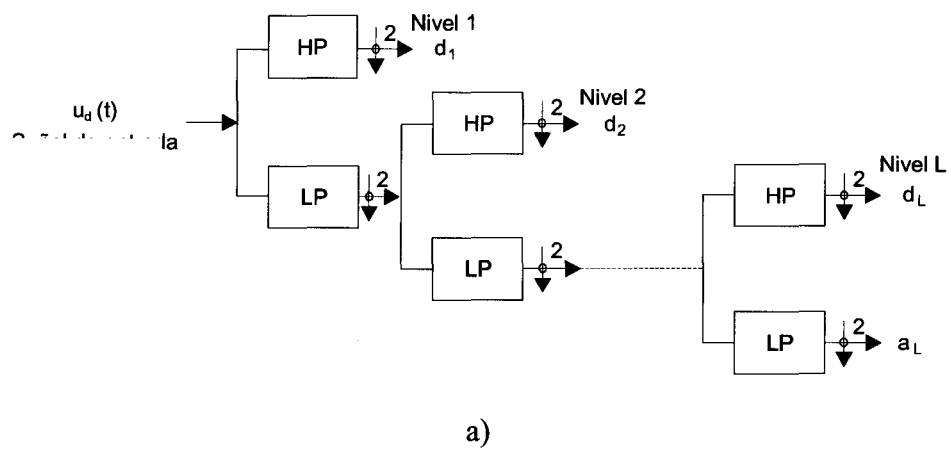


FIGURA 1



b)

FIGURA 2

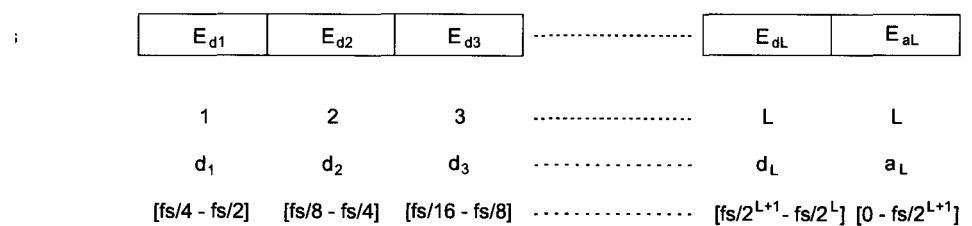


FIGURA 3

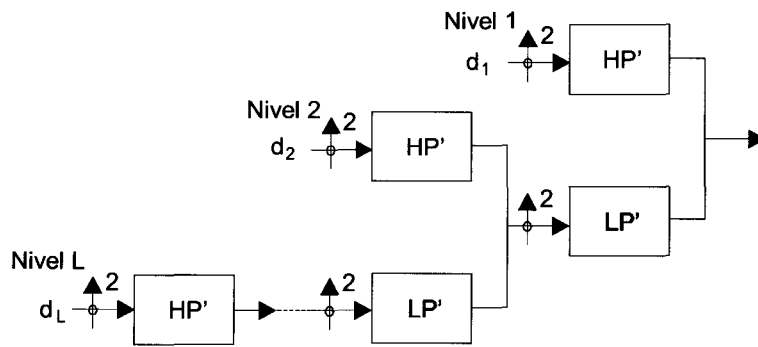
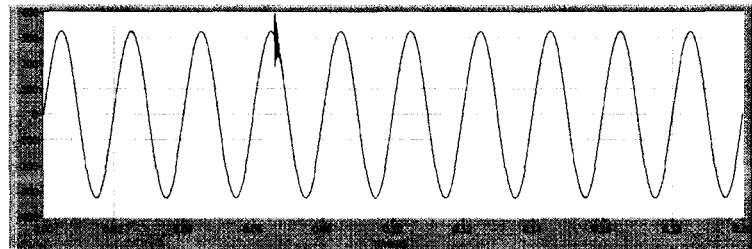
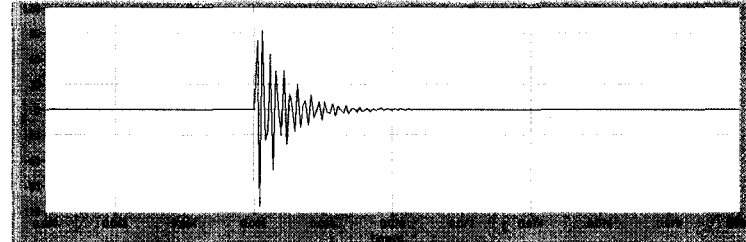


FIGURA 4



a)



b)

FIGURA 5

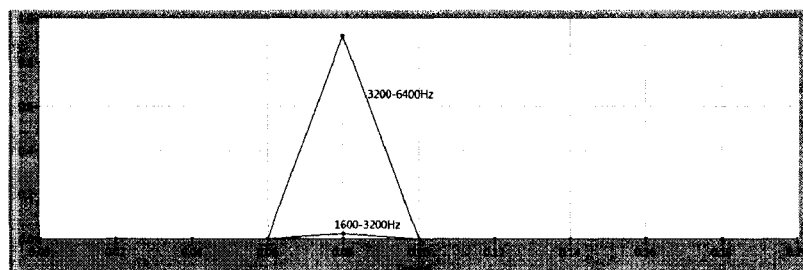


FIGURA 6

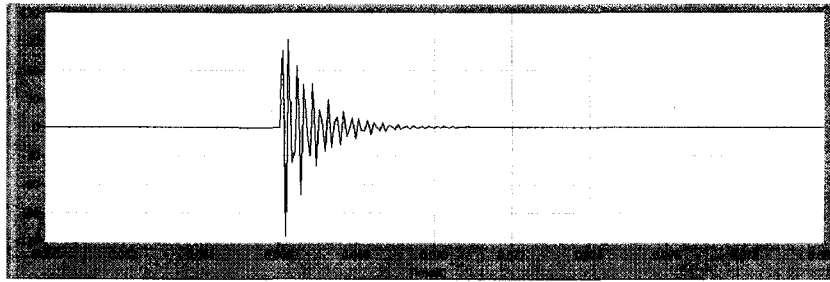
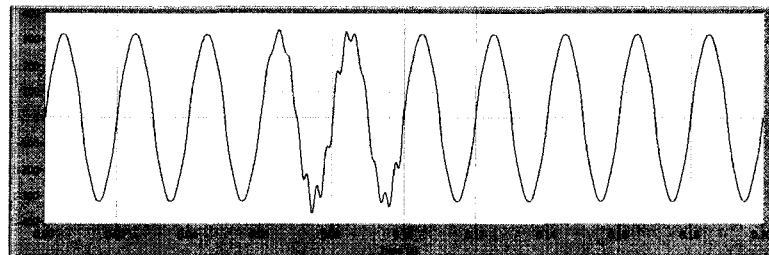
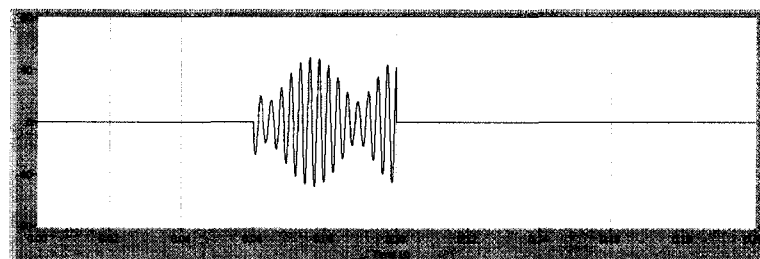


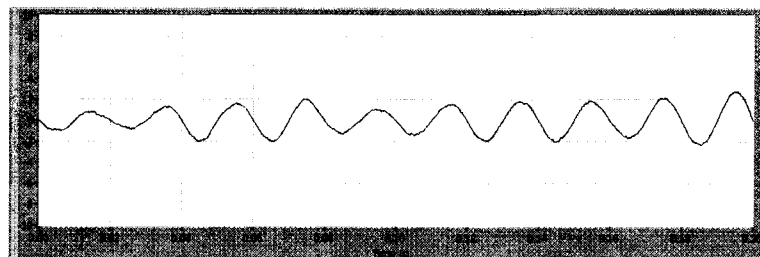
FIGURA 7



a)

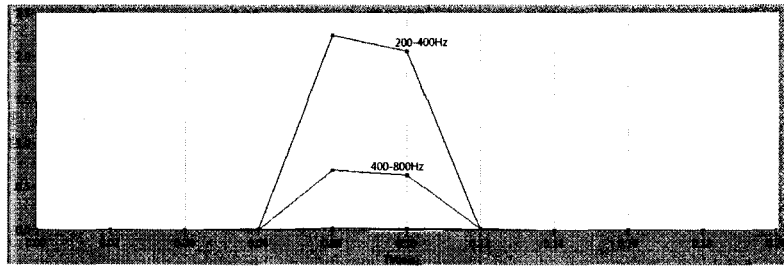


b)

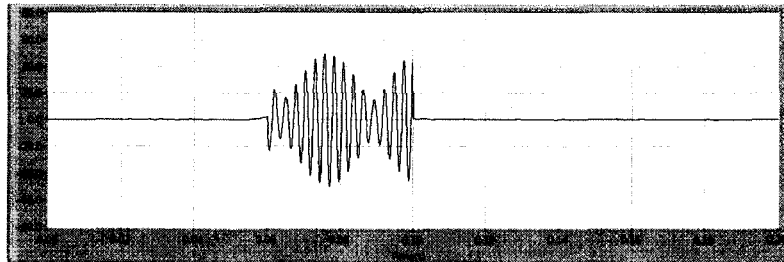


c)

FIGURA 8

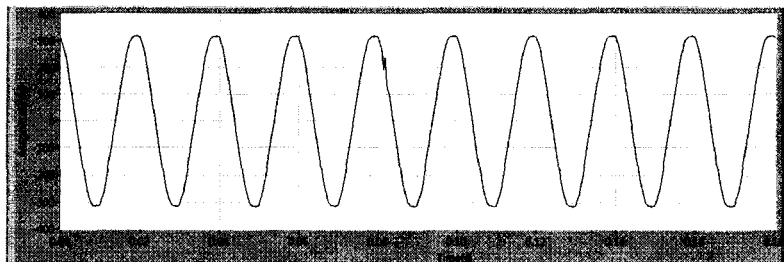


a)

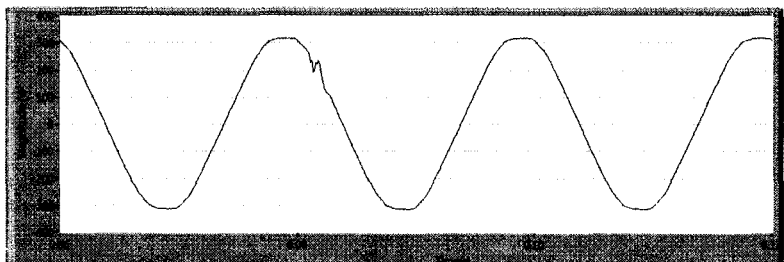


b)

FIGURA 9



a)

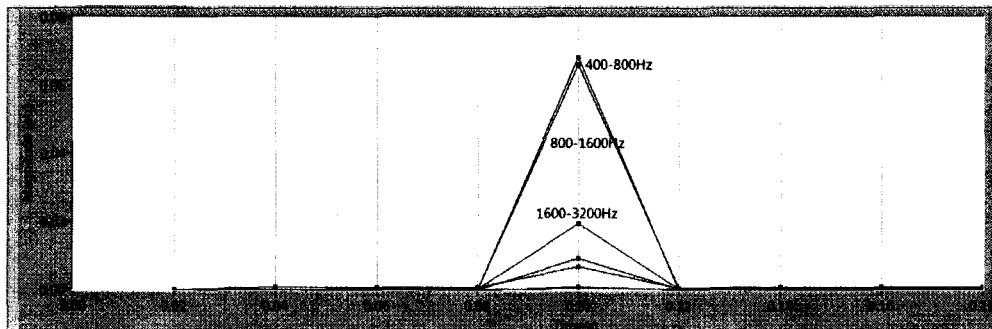


b)

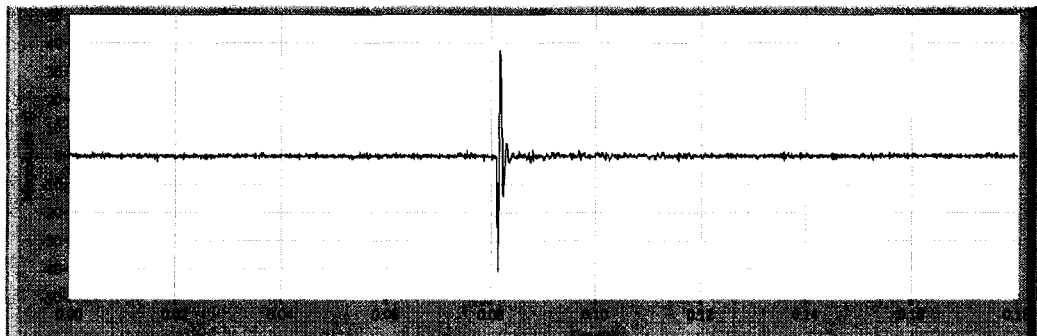


c)

FIGURA 10



a)



b)

FIGURA 11



- ②<sup>1</sup> N.º solicitud: 201200892  
②<sup>2</sup> Fecha de presentación de la solicitud: 11.09.2012  
③<sup>2</sup> Fecha de prioridad:

## INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TECNICA

⑤<sup>1</sup> Int. Cl.: **G01R31/08** (2006.01)

### DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	⑤ <sup>6</sup> Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
X	COSTA et al., "Real-time detection of voltage sags based on wavelet transform," Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T&D-LA), 2010 IEEE/PES, pp.537,542, 8-10 Nov. 2010; doi:10.1109/TDC-LA.2010.5762934; URL: <a href="http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&amp;arnumber=5762934&amp;isnumber=5762851">http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&amp;arnumber=5762934&amp;isnumber=5762851</a>	1-12

#### Categoría de los documentos citados

X: de particular relevancia

Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría

A: refleja el estado de la técnica

O: referido a divulgación no escrita

P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud

E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud

#### El presente informe ha sido realizado

☒ para todas las reivindicaciones

☐ para las reivindicaciones nº:

Fecha de realización del informe  
09.04.2013

Examinador  
M. P. López Sabater

Página  
1/4

Documentación mínima buscada (sistema de clasificación seguido de los símbolos de clasificación)

G01R

Bases de datos electrónicas consultadas durante la búsqueda (nombre de la base de datos y, si es posible, términos de búsqueda utilizados)

INVENES, EPODOC

Fecha de Realización de la Opinión Escrita: 09.04.2013

**Declaración****Novedad (Art. 6.1 LP 11/1986)**

Reivindicaciones 1-12  
Reivindicaciones

SI  
NO

**Actividad inventiva (Art. 8.1 LP11/1986)**

Reivindicaciones  
Reivindicaciones 1-12

SI  
NO

Se considera que la solicitud cumple con el requisito de aplicación industrial. Este requisito fue evaluado durante la fase de examen formal y técnico de la solicitud (Artículo 31.2 Ley 11/1986).

**Base de la Opinión.-**

La presente opinión se ha realizado sobre la base de la solicitud de patente tal y como se publica.



**1. Documentos considerados.-**

A continuación se relacionan los documentos pertenecientes al estado de la técnica tomados en consideración para la realización de esta opinión.

Documento	Número Publicación o Identificación	Fecha Publicación
D01	COSTA et al., "Real-time detection of voltage sags based on wavelet transform," Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T&D-LA), 2010 IEEE/PES, pp.537,542, 8-10 Nov. 2010 doi: 10.1109/TDC-LA.2010.5762934 URL: <a href="http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&amp;arnumber=5762934&amp;isnumber=5762851">http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&amp;arnumber=5762934&amp;isnumber=5762851</a>	

**2. Declaración motivada según los artículos 29.6 y 29.7 del Reglamento de ejecución de la Ley 11/1986, de 20 de marzo, de Patentes sobre la novedad y la actividad inventiva; citas y explicaciones en apoyo de esta declaración****Reivindicación 1:**

El documento del estado de la técnica más cercano a esta primera reivindicación es D01, en el que se divulga un método de detección de una perturbación transitoria en una señal de tensión de suministro eléctrico que comprende el muestreo de una serie de señales de partida, entre ellas la tensión. A estas señales se les aplica una transformada wavelet discreta para descomponer cada una de ellas en una pluralidad de bandas de frecuencia, obteniendo una pluralidad de coeficientes  $d_{ij}$ . A partir de dicha pluralidad de coeficientes  $\omega_n$ , se calcula un vector de energías  $\epsilon_k$ , que se empleará para valorar si existe o no perturbación.

La diferencia entre esta reivindicación y el documento D01 es que en la reivindicación la transformada wavelet discreta se aplica a la función diferencia que se obtiene restando a los valores detectados de la señal empleada, los valores obtenidos de la misma en un ciclo de muestreo anterior, mientras que en D01 se toma directamente como señal de partida la señal muestreada. Posteriormente, en D01 se evalúa, para determinar la existencia de un transitorio, el vector de energías de la función muestreada, mientras que en la reivindicación se estudia el vector de energías de la diferencia de funciones.

Estos dos métodos son equivalentes, independientemente de que los ciclos con los que se compara la señal muestreada sean el inmediatamente anterior o cuatro antes, puesto que esto solamente es una mera elección por parte del solicitante. Por lo tanto, esta primera reivindicación carece de actividad inventiva según el artículo 8 de la Ley de Patentes 11/86.

**Reivindicaciones 2 a 12:**

El resto de las reivindicaciones de la solicitud se ven afectadas en su actividad inventiva por D01 de la misma manera que la primera reivindicación.